

Н.В. Рязанова-Хитровська, І.М. Пижов, д-р техн. наук,  
Л.І. Пупань, канд. техн. наук, Харків, Україна

## **РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ДЕТАЛІ ПІСЛЯ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ**

*Проведено дослідження напружено-деформованого стану поверхневого шару зони контакту алмазного вигладжувача із оброблюваною деталлю. Особливу увагу приділено встановленню виду та значень залишкових напружень в поверхневому шарі деталей у статичі. Використовуючи літературні данні встановлені математичні формули для знаходження значень залишкових напружень в поверхневому шарі після алмазного вигладжування в залежності від величини еквівалентних напружень.*

*Ключові слова: алмазне вигладжування, алмазний вигладжувач, оброблюваний матеріал, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження, математична модель*

*Проведено исследование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя зоны контакта алмазного шлифователя с обрабатываемой деталью. Особое внимание уделено установлению вида и значений остаточных напряжений в поверхностном слое деталей в статике. Используя литературные данные установлены математические формулы для нахождения значений остаточных напряжений в поверхностном слое после алмазного шлифования в зависимости от величины эквивалентных напряжений.*

*Ключевые слова: алмазное шлифование, алмазный шлифователь, обрабатываемый материал, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, математическая модель*

*The investigation of deflected mode of surface layer of the contact area of diamond burnishing tool with the workpiece is carried out. Particular attention is paid to establishing the type and values of residual stresses in the surface layer of static parts. Using the literature data, mathematical formulas are established for finding the values of residual stresses in the surface layer after diamond smoothing, depending on the magnitude of equivalent stresses.*

*Keywords: diamond burnishing, diamond smoother, processed material, the stress-strain state, equivalent stresses, mathematical model*

**1. Постановка проблеми.** В умовах експлуатації поверхневий шар (ПШ) деталі піддається найбільш сильному фізико-хімічного впливу: механічному, тепловому, магнітоелектричній, світловому, хімічному і ін. В більшості випадків у деталі починають погіршуватися службові властивості поверхні, наприклад, знос, ерозія, кавітація, корозія, внутрішні тріщини і інші руйнування розвиваються спочатку на поверхні. Тому до ПШ пред'являються зазвичай вищі вимоги, ніж до основної маси деталі [1]. При механічній обробці в ПШ деталей, які піддаються пластичній деформації, виникають залишкові напруження (ЗН), які істотно впливають на експлуатаційні властивості обробленої поверхні. По протяжності силового поля розрізняють наступні

залишкові напруги: напруга першого роду, або макронапруження, що охоплюють області, розміри яких порівнянні з розмірами деталі, вони мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі, виникають від неоднорідності силового, температурного поля всередині деталі; напруги другого роду, або мікронапруги, що поширюються на окремі зерна або на групу зерен; напруги третього роду (субмикроскопічні), що відносяться до спотворень атомної кристалічної решітки [2]. Тому знаходження ЗН для деталей, які підлягають процесу алмазного вигладжування слід вважати актуальними і важливими для різних галузей промисловості.

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В основі виникнення ЗН зазвичай лежать незворотні об'ємні зміни в матеріалі. У багатьох випадках при визначенні ЗН деталі машин (або їх окремі частини) можуть розглядатися як порожнисті або суцільні циліндри (вали, ротори, прокатні валики і т.п.) [2]. Основна особливість циліндричних деталей полягає в тому, що в них можуть існувати осьові ЗН (крім окружних і радіальних ЗН, див. рис. 1).

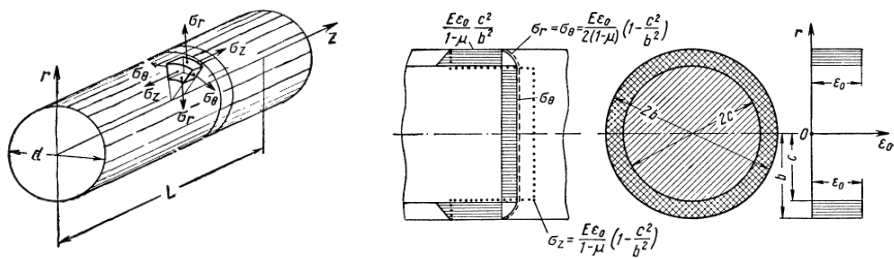


Рисунок 1 - Схема розподілу залишкових напружень в суцільному циліндрі при об'ємній деформації в поверхневому шарі [2]

Аналіз літератури [1-14] показав, що дослідження, присвячені питанням розрахунку ЗН і їх розподіл по площинах контакту алмазного вигладжувача і оброблювального матеріалу не мають одноставного визначення. Відповідно, дана стаття узагальнює матеріали і дає необхідні дані про розрахунок ЗН в ПШ деталі після алмазного вигладжування за допомогою еквівалентних напружень, знайдених шляхом 3D моделювання системи «алмазний вигладжувач – оброблювальний матеріал» методом скінченних елементів.

**3. Мета дослідження.** Визначення характеру і величини ЗН в ПШ деталі після алмазного вигладжування сталевих деталей у статичі.

**4. Матеріали дослідження.** Для досягнення поставленої мети скористаємося даними робіт [1] і [2].

В межах пружних деформацій будемо мати наступні рівняння напружень [2]:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \epsilon_{0r}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] + \varepsilon_{0\theta}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_{\theta})] + \varepsilon_{0z}, \quad (3)$$

де  $\sigma_r$ ,  $\sigma_{\theta}$  та  $\sigma_z$  - радіальні, окружні і осьові ЗН, відповідно;

$\varepsilon_{0r}$ ,  $\varepsilon_{0\theta}$  и  $\varepsilon_{0z}$  - радіальні, окружні і осьові початкові залишкові деформації, відповідно;

$E$  - модуль пружності матеріалу;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

Биргер І.А. після перетворення (1) встановив формули для знаходження ЗН в ПШ деталі:

$$\sigma_r = \frac{E \varepsilon_0 c^2}{2(1-\mu)} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{b^2} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta} = -\frac{E \varepsilon_0 c^2}{2(1-\mu)} \left( \frac{1}{r^2} + \frac{1}{b^2} \right); \quad (5)$$

$$\sigma_z = -\frac{E \varepsilon_0 c^2}{1-\mu} \frac{1}{b^2}. \quad (6)$$

Дані формули дозволяють визначити ЗН в ПШ деталі для процесів різання у статиці.

Для того, щоб використати формули (4-6) для процесу алмазного вигладжування застосуємо еквівалентні напруги, знайдені нами за допомогою 3D НДС системи «алмазний вигладжувач – оброблювальний матеріал» методом скінченних елементів [15].

Після перетворень отримуємо робочу формулу знаходження ЗН в ПШ сталевій деталі після алмазного вигладжування у статиці:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\text{ЗНБ}} c^2}{2} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{b^2} \right); \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta} = -\frac{\sigma_{\text{ЗНБ}} c^2}{2} \left( \frac{1}{r^2} + \frac{1}{b^2} \right); \quad (8)$$

$$\sigma_z = -\sigma_{\text{ЗНБ}} \frac{c^2}{b^2}, \quad (9)$$

де  $\sigma_{\text{ЗНБ}}$  – еквівалентні напруги, в якій вже закладені режими обробки і початкові деформації.

Для порівняння розрахункових даних використовували результати роботи [1] (графік розподілу ЗН в ПШ наведено на рис. 2). Дані, отримані за формулами (7-9), наведені на рис. 3.

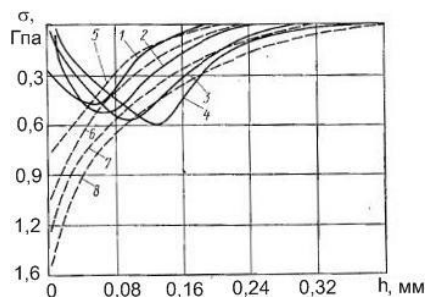


Рисунок 2 – Розподіл тангенціальних (1,2,3,4) та осьових (5,6,7,8) ЗН в ПШ сталі 40X в залежності від режимів обробки (експериментальні дані) [1]:  
1, 5 –  $P=50\text{Н}$ ; 2, 6 –  $P=100\text{Н}$ ; 3, 7 –  $P=150\text{Н}$ ; 4, 8 –  $P=200\text{Н}$

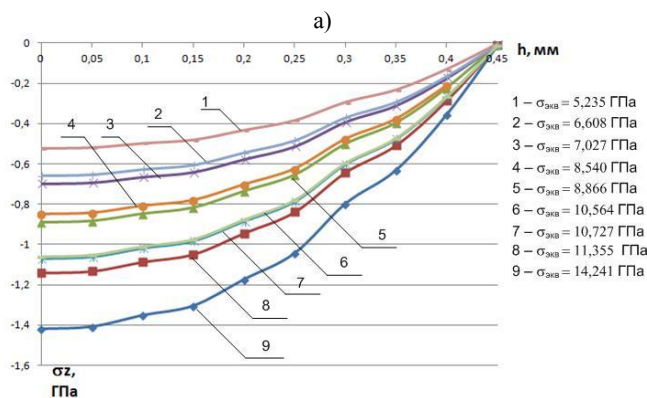
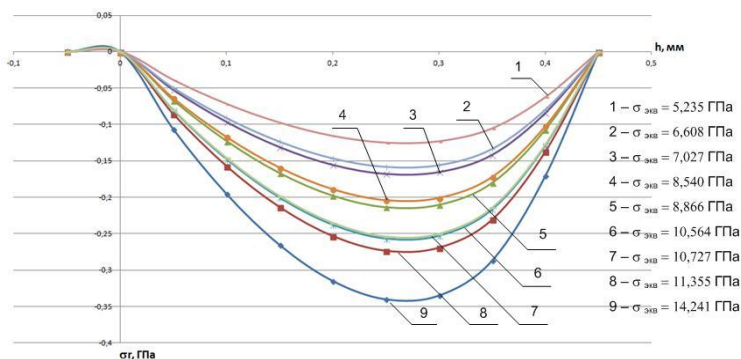


Рисунок 3 – Розподіл тангенціальних (а) та осьових (б) ЗН у ПШ покращеної сталі 45 в залежності від еквівалентних напруг (отримані обчисленням)

**Висновки та перспективи розвитку.** На підставі отриманих значень  $\sigma_{\text{скв}}$  встановлені ЗН в ПШ сталевій деталі в статичі, які підтверджуються практичними експериментами, наведеними в літературних джерелах. Вони свідчать про те, що при збільшенні еквівалентних напруг зростають і тангенціальні та осеві ЗП у ПШ деталі. Знайдені математичні формули для визначення характеру і величини ЗН у ПШ деталі після алмазного вигладжування у статичі можуть бути використані для практичних розрахунків і використовуватися при визначенні режимів обробки сталевих деталей методом пластичної поверхневої деформації.

Надалі планується дослідити особливості процесу вигладжування при використанні алмазних вигладжувачів різної форми.

**Список використаних джерел:** 1. *Торбило В.М.* Алмазное выглаживание [Текст] / В. М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с. 2. *Биргер И. А.* Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: Mashgiz, 1963. – 232 с. 3. *Балтер М.А.* Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с. 4. *Брондз Л.Д.* Влияние поверхностного упрочнения на шероховатость высокопрочных сталей при повышенных температурах испытания. / Л.Д. Брондз, В.Ф. Воронов – В. кн.: Поверхностный наклеп высокопрочных материалов. – М.: ОНТИ-ВИАМ, 1971. – С. 213-221. 5. *Рыковский Б.П.* Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М. Щетинин. – М.: Машиностроение, 1985. 152 с. 6. *Смелянский В.М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. / В.М. Смелянский – М.: Машиностроение, 2002. – 299 с. 7. *Ардашинков Б.Н.* Исследование влияния шероховатости и наклепа на износостойкость // Технологические методы повышения качества поверхности деталей машин. / Б.Н. Ардашинков, Ю.Р. Витенберг.- Л., 1978. С. 162-167. 8. *Баландин В.М.* Влияние поверхностного пластического деформирования на износостойкость нормализованной стали // Труды Волгоградского политехнического института. / В.М. Баландин А.В. Гурьев.- Волгоград, 1975. №7. С. 9-17. 9. *Вейцман М.Г.* Упрочнение титановых сплавов поверхностным пластическим деформированием / М.Г. Вейцман. В.Г. Вайнштейн.- "Вестник машиностроения", 1975. – С. 73-75. 10. *Дубенко В.В.* Обработка деталей алмазным выглаживанием / Дубенко В.В. – Машиностроитель, 1974. № 34. С. 36-37. 11. *Паншев Д.Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием/ Д.Д. Паншев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с. 12. *Торбило В.М.* Силовое выглаживание/ В.М. Торбило // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. – Пермь, 1983. С. 57-60. 13. *Грановский Э.Г.* Измерение износа алмазных выглаживателей/ Э.Г. Грановский // Известия вузов. – 1968. №11. – С. 128-131. 14. *Бобровский Н.М.* Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей / Н.М. Бобровский. // Тольяттинский Государственный Университет. – Тольятти, 2008. – 170с. 15. *Рязанова - Хитровская Н. В.* Исследование напряженно-деформированного состояния зоны обработки при алмазном выглаживании / Н. В. Рязанова-Хитровская, И. Н. Пыжов // Резание и инструмент в технологических системах – Харьков: НТУ «ХПИ», 2016.– с. 151-159.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Torbilo V.M.* Almaznoe vyglazhivanie [Tekst] / V. M. Torbilo. – М.: Mashinostroenie, 1972. – 105 s. 2. *Birger I. A.* Ostatochnye naprjazhenija / I. A. Birger. – М.: Mashgiz, 1963. – 232 s. 3. *Balter M.A.* Uprochnenie detalej mashin / M.A. Balter – М.: Mashinostroenie, 1978. – 184 s. 4. *Brondz L.D.* Vlijanie poverhnostnogo uprochnenija na sherohovatost' vysokoprochnyh stalej pri povyshennyh temperaturah ispytaniya. / L.D. Brondz, V.F. Voronov – V. kn.: Poverhnostnyj naklep vysokoprochnyh materialov. – М.: ONTI-VIAM, 1971. – S. 213-221. 5. *Rykovskij B.P.* Mestnoe uprochnenie detalej poverhnostnym naklepom. / B.P. Rykovskij, V.A. Smirnov, G.M. Shhetinin.-М.: Mashinostroenie, 1985. – 152 s. 6. *Smeljanskij V.M.* Mehanika uprochnenija detalej poverhnostnym

plasticheskim deformirovaniem. / V.M. Smeljanskij – M. : Mashinostroenie, 2002.– 299 s.

**7. Ardashinkov B.N.** Issledovanie vlijanija sherohovatosti i naklepa na iznosostojkost' // Tehnologicheskie metody povyshenija kachestva poverhnosti detalej mashin. / B.N. Ardashinkov, Ju.R. Vitenberg.– L., 1978. – S. 162-167. **8. Balandin V.M.** Vlijanie poverhnostnogo plasticheskogo deformirovanija na iznosostojkost' normalizovannoj stali // Trudy Volgogradskogo politehnicheskogo instituta. / V.M. Balandin A.V. Gur'ev.– Volgograd, 1975. №7. – S. 9-17. **9. Vejcmán M.G.** Uprochnenie titanovyh splavov poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem / M.G. Vejcmán. V.G. Vajnshtejn.– "Vestnik mashinostroenija", 1975. – S. 73-75. **10. Dubenko V.V.** Obrabotka detalej almaznym vyglazhivaniem / Dubenko V.V. - Mashinostroitel', 1974. № 34. – S. 36-37. **11. Papshev D.D.** Otdelochno-uprochnjajushaja obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem./ D.D. Papshev. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 152 s. **12. Torbilo V.M.** Silovoe vyglazhivanie/ V.M. Torbilo. // Sovershenstvovanie processov abrazivno-almaznoj i uprochnjajushhej tehnologii v mashinostroenii. - Perm', 1983. – S. 57-60. **13. Granovskij Je.G.** Izmerenie iznosa almaznyh vyglazhivatelej / E.G. Granovskij // Izvestija vuzov. – 1968. №11. – S. 128-131. **14. Bobrovskij N.M.** Razrabotka nauchnyh osnov processa obrabotki detalej poverhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primenenija smazочно-ohlazhdajushhih zhidkostej / N.M. Bobrovskij. // Tol'jattinskij Gosudarstvennyj Universitet. – Tol'jatti, 2008. – 170s. **15. Rjazanova-Hitrovskaja N.V.** Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija zony obrabotki pri almaznom vyglazhivanii / N.V. Rjazanova-Hitrovskaja, I.N. Pyzhov // Rezanie i instrument v tehnologicheskijh sistemah – Har'kov: NTU «HPI», 2016. – s. 151-159.